

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΠΥΡΟΛΥΣΗΣ

Α. Καλογιάννη, Σ. Μπεζεργιάννη

Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης/ Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών (ΕΚΕΤΑ/ΙΤΧΗΔ), 57001, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η εφαρμογή της στατιστικής ανάλυσης πολλαπλών μεταβλητών σε πραγματικά δεδομένα μιας διεργασίας υδρογονοπυρόλυσης βαριού αερίλαιου, σε σταθερή πίεση και σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες. Η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (Principal Component Analysis) εντόπισε χρονικά σημεία στα οποία υπήρχε αυξημένη μεταβλητότητα. Αυτά τα σημεία εξετάστηκαν περαιτέρω με τη χρήση διαγραμμάτων συμβολής (contribution plots) και ανιχνεύθηκαν οι διαταραχές, οι οποίες ευθύνονται για την αυξημένη μεταβλητότητα των υπό εξέταση χρονικών σημείων και προσδιορίστηκαν τα αίτια τους.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Λόγω της εκ φύσεως πολυδιαστατικότητας των χημικών διεργασιών, οι τεχνικές στατιστικού ελέγχου διεργασιών (Statistical Process Control-SPC) πολλαπλών μεταβλητών προσφέρουν καλύτερο έλεγχο από ότι οι τεχνικές μονοπαραγοντικής ανάλυσης [1,2,3]. Σε αυτήν την εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος στατιστικού ελέγχου, για τον έλεγχο της μεταβλητότητας μιας διεργασίας υδρογονοπυρόλυσης. Το κύριο κίνητρο για την εκπόνηση της μελέτης ήταν η υψηλή μεταβλητότητα που παρουσίασε η διεργασία και οι συχνές διαταραχές που παρατηρήθηκαν βάσει ιστορικών δεδομένων.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Προκειμένου να μειωθεί η διαστατικότητα της διεργασίας της υδρογονοπυρόλυσης, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών - (Principal Components Analysis – PCA). Η μέθοδος αυτή έχει σκοπό να δημιουργήσει γραμμικούς συνδυασμούς των αρχικών μεταβλητών, έτσι ώστε οι γραμμικοί αυτοί συνδυασμοί να είναι ασυσχέτιστοι μεταξύ τους, αλλά να περιέχουν όσο γίνεται μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης των αρχικών μεταβλητών.

Η Παράλληλη Ανάλυση είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό του αριθμού των κύριων συνιστωσών οι οποίες θα πρέπει να διατηρηθούν σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο [9]. Η μέθοδος μπορεί να αντιπροσωπευθεί σχηματικά από το διάγραμμα των ιδιοτιμών του πίνακα συνδιακύμανσης με φθίνουσα σειρά και μιας άλλης καμπύλης η οποία απεικονίζει τις ιδιοτιμές των ιδιοτιμών των ανεξάρτητων δεδομένων (Σχήμα 1). Το σημείο όπου συναντώνται οι καμπύλες καθορίζει τον αριθμό των κύριων συνιστωσών που είναι απαραίτητο να διατηρηθούν. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή δείχνει το όριο σημασίας των ιδιοτιμών.

Όταν ο αριθμός των κύριων συνιστωσών και των προβολών y έχουν καθοριστεί, μπορούν να κατασκευαστούν δυο διαγράμματα στατιστικού ελέγχου διεργασιών, γνωστά ως PCA control charts (Σχήμα 2). Το πρώτο βασίζεται στην στατιστική θεωρία του T^2 του Hotelling. Το T^2 αντιπροσωπεύει το συνολικό ποσό της έμφυτης μεταβλητότητας της διεργασίας. Μια σημαντική αλλαγή στην τιμή του είναι ένας δείκτης της ύπαρξης μιας διαταραχής στη διεργασία. Η στατιστική κατανομή των τιμών του ακολουθεί την κατανομή F. Υπολογίζεται ως εξής:

$$T^2 = y_k^T y_k \quad (1)$$

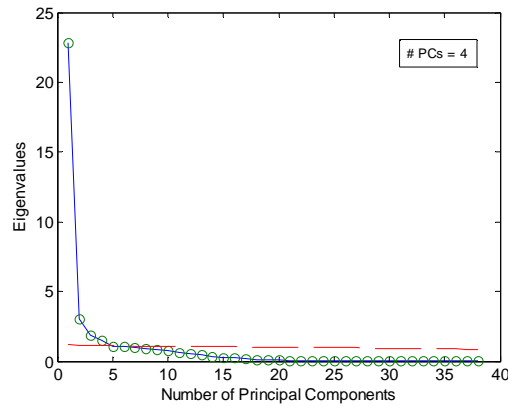
όπου y ο πίνακας των ανηγμένων τιμών των αρχικών μεταβλητών και k ο αριθμός των κύριων συνιστωσών.

Το δεύτερο PCA control chart υπολογίζεται από το άθροισμα των τετραγώνων της διαφοράς της πραγματικής από την εκτιμώμενη τιμή. Η τιμή του Q είναι ένα μέτρο του πόσο καλά ανταποκρίνεται το μοντέλο και δείχνει τη διαφορά των πραγματικών από τα εκτιμώμενα δεδομένα. Τα όρια των διαγραμμάτων μπορούν να υπολογιστούν με βάση τα επιλεγμένα επίπεδα εμπιστοσύνης που προκύπτουν από την κατανομή F και t αντίστοιχα. Υπολογίζεται ως εξής:

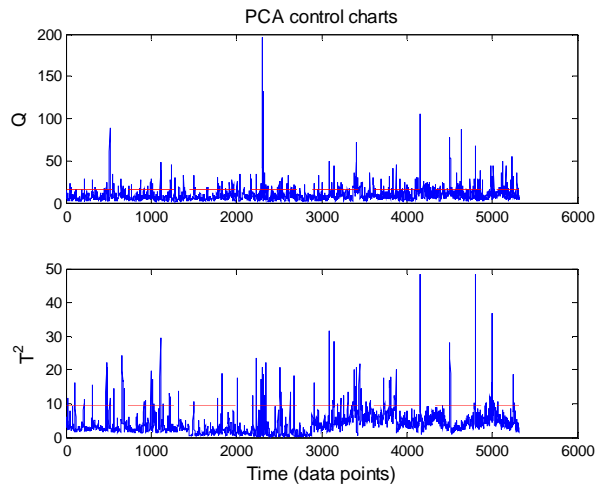
$$Q = (x - \hat{x})^T (x - \hat{x}) = (x - W_k (W_k^T W_k)^{-1} y_k)^T (x - W_k (W_k^T W_k)^{-1} y_k) \quad (2)$$

όπου x ο πίνακας των αρχικών μεταβλητών, W_k ο πίνακας μετασχηματισμού των τιμών y σε κανονικοποιημένες τιμές, ώστε η μεταβλητότητά τους να ισούται με 1 και y_k οι κανονικοποιημένες τιμές y .

Για το επιλεγμένο σύνολο των δεδομένων κανονικής λειτουργίας (Normal Operating Data – NOD), τα αντίστοιχα διαγράμματα PCA του μοντέλου παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Το σύνολο των δεδομένων κανονικής λειτουργίας στην πραγματικότητα δεν αντιστοιχεί σε 100% κανονική λειτουργία, δεδομένου ότι περιέχουν διάφορες διαταραχές.



Σχήμα 1. Παράλληλη Ανάλυση σε μονάδα υδρογονοπυρόλυσης (σύνολο 38 δεδομένων)



Σχήμα 2. Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών σε μονάδα υδρογονοπυρόλυσης (NOD για διάστημα 2-25/06/2007)

Χρησιμοποιώντας τα NOD, μπορούμε να υπολογίσουμε τον πίνακα μετασχηματισμού W_k καθώς επίσης και τα όρια ελέγχου των δύο στατιστικών διαγραμμάτων ελέγχου, τα οποία θα αποτελέσουν τη βάση του PCA μοντέλου. Έχοντας αυτό το μοντέλο, μπορούμε να ελέγξουμε οποιοδήποτε άλλο σύνολο στοιχείων χρησιμοποιώντας τον ίδιο πίνακα μετασχηματισμού, W_k και υπολογίζοντας τις νέες τιμές y_k . Κατόπιν, οι νέες τιμές των διαγραμμάτων T^2 και Q μπορούν να υπολογιστούν και να σχεδιαστούν σε σχέση με το χρόνο.

Για τις διεργασίες πιλοτικής κλίμακας και συνεχούς λειτουργίας, οι διαγνωστικές πληροφορίες για κάποιες διαταραχές ή για την αυξημένη μεταβλητότητα που προκαλούν, μπορούν να απαχθούν με τη δημιουργία διαγραμμάτων συμβολής για τα συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα όπου παρατηρήθηκε η αυξημένη μεταβλητότητα [7]. Αυτά τα διαγράμματα συμβολής είναι ένα σύνολο ιστογραμμάτων που παρουσιάζουν το συσχετισμό της μεταβλητότητας και των μεταβλητών (X), των προβολών τους (Y) για αυτό το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Κατόπιν, εξετάζονται οι προβολές που έχουν την υψηλότερη τιμή, με σύγκριση των αντίστοιχων συντελεστών βαρύτητας (W) και των εκτιμώμενων τιμών με βάση το μοντέλο (Σχήμα 4).

Στο Σχήμα 4 το πρώτο διάγραμμα δείχνει τη σχετική συμβολή της κάθε μιας μεταβλητής ξεχωριστά στη μεταβλητότητα της διεργασίας, για ένα συγκεκριμένο χρονικό σημείο. Οι διαγνωστικές πληροφορίες που εξάγονται από το μοντέλο PCA αντιπροσωπεύονται στα τελευταία τρία ιστογράμματα. Το διάγραμμα των συνιστωσών Y παρουσιάζει το ποσό της σχετικής πρόσθετης μεταβλητότητας για κάθε μια κύρια συνιστώσα. Δεδομένου ότι η συνιστώσα αυτή είναι η πιο συνδεδεμένη με τη μεταβλητότητα, μπορούμε να προχωρήσουμε περαιτέρω και να εξετάσουμε τους συντελεστές βαρύτητας κάθε μιας από τις μεταβλητές. Από το τρίτο ιστογράμμα παρατηρούμε ένα σύνολο μεταβλητών που συσχετίζονται έντονα τη συγκεκριμένη συνιστώσα και επομένως συσχετίζονται με την αυξημένη μεταβλητότητα. Τέλος, το τελευταίο διάγραμμα παρουσιάζει τα υπόλοιπα του μοντέλου PCA για κάθε μια από τις μεταβλητές. Όλες οι μεταβλητές που περιλαμβάνονται στα ιστογράμματα είναι ανηγμένες (μοναδιαία μεταβλητότητα). Τα όρια ελέγχου στα πρώτα δύο διαγράμματα είναι τα όρια εμπιστοσύνης 99% (-3σ και 3σ).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (PCA) εφαρμόστηκε με σκοπό τον έλεγχο της συνολικής μεταβλητότητας της διεργασίας της υδρογονοπυρόλυσης, σε πραγματικά ιστορικά δεδομένα πειραμάτων υδρογονοπυρόλυσης βαριού πετρελαϊκού κλάσματος VGO (βαρύ αερίωλο κενού), τα οποία διεξήχθησαν στην πιλοτική μονάδα υδρογονοπυρόλυσης (VB-01), υπό σταθερή πίεση και σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες αντίδρασης.

Η πιλοτική μονάδα VB-01 αποτελείται από τέσσερα τμήματα: α) σύστημα τροφοδοσίας, β) τμήμα αντίδρασης, γ) τμήμα διαχωρισμού, δ) σύστημα συλλογής προϊόντων. Διαθέτει 17 κλειστά συστήματα ελέγχου (closed-loop), για τη διατήρηση σταθερών λειτουργικών συνθηκών (θερμοκρασία, πίεση, ροές) και στα τέσσερα τμήματα της μονάδας. Η διεργασία της υδρογονοπυρόλυσης σε αυτήν τη μονάδα περιγράφεται από 38 μεταβλητές.

Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων

Τα δεδομένα που χρειάστηκαν για το στατιστικό έλεγχο της μονάδας υδρογονοπυρόλυσης VB-01, συλλέχθηκαν μέσω του συστήματος αρχειοθέτησης OSISOFT PI, για το διάστημα που διεξήχθη το πείραμα υδρογονοπυρόλυσης αερίωλου της στήλης κενού στη μονάδα VB-01, δηλαδή από 2 έως 25 Ιουνίου 2007, με συχνότητα 1 min. Τα παραπάνω δεδομένα είναι οι θερμοκρασίες όλων των γραμμών στο σύστημα της τροφοδοσίας, στη γραμμή των αερίων και των υγρών προϊόντων, οι θερμοκρασίες των εσωτερικών και εξωτερικών θερμοστοιχείων του αντιδραστήρα, η θερμοκρασία του διαχωριστή, η ροή αερίου (H_2), η πίεση του συστήματος πριν και μετά τον αντιδραστήρα της μονάδας, το ύψος της στάθμης του διαχωριστή και τέλος το % άνοιγμα των ρυθμιστικών βανών πίεσης και στάθμης διαχωριστή (Πίνακας 1). Τα δεδομένα που εξετάστηκαν αντιστοιχούν στις πραγματικές στιγμιαίες τιμές των 38 μεταβλητών, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα set points αυτών, που παραμένουν σταθερά. Το μέγεθος των δεδομένων που εξετάζουμε τελικά προκύπτουν από 33321 δειγματοληψίες (datapoints) συνολικά. Όλοι οι αναγκαίοι υπολογισμοί για την

ανάπτυξη του στατιστικού μοντέλου PCA καθώς και η ανάπτυξη όλων των διαγραμμάτων έγινε με τη χρήση του λογισμικού MATLAB.

Πίνακας 1. Περιγραφή μεταβλητών διεργασίας υδρογονοπυρόλυσης

Αριθμός Μεταβλητής	Όνομα Μεταβλητής	Περιγραφή	Μονάδες Μέτρησης
1	FT-21A	H ₂ flow to reactor (primary)	scfh
2	FT-21B	H ₂ flow to reactor (secondary)	scfh
3	LT-91	Separator level	%
4	LV-91	Separator level controller output	%
5	PT-101	RX outlet pressure	psig
6	PT-23	RX inlet pressure	psig
7	PV-81	Outlet pressure controller output	%
8	TE-101	RX zone-1 outer temperature	°F
9	TE-102	RX zone-2 outer temperature	°F
10	TE-103	RX zone-3 outer temperature	°F
11	TE-104	RX zone-4 outer temperature	°F
12	TE-105	RX zone-5 outer temperature	°F
13	TE-106	RX zone-6 outer temperature	°F
14	TE-111	RX zone-1 inner temperature	°F
15	TE-112	RX zone-2 inner temperature	°F
16	TE-113	RX zone-3 inner temperature	°F
17	TE-114	RX zone-4 inner temperature	°F
18	TE-115	RX zone-5 inner temperature	°F
19	TE-116	RX zone-6 inner temperature	°F
20	TE-117	Reactor PRODUCT temperature	°F
21	TE-52	Feed recycle temperature	°F
22	TE-53	Feed to RX temperature	°F
23	TE-81	Gas product temperature	°F
24	TE-91	Separator temperature	°F
25	TE-92	Liquid product to sample temperature	°F
26	TE-93	Product sample heater temperature	°F
27	TIC-101	RX zone-1 temperature controller	%
28	TIC-102	RX zone-2 temperature controller	%
29	TIC-103	RX zone-3 temperature controller	%
30	TIC-104	RX zone-4 temperature controller	%
31	TIC-105	RX zone-5 temperature controller	%
32	TIC-106	RX zone-6 temperature controller	%
33	TIC-117	Reactor PRODUCT temperature Controller	%
34	TIC-52	Feed recycle temperature controller	%
35	TIC-53	Feed to RX temperature controller	%
36	TIC-91	Separator temperature controller	%
37	TIC-92	Liquid product to sample temperature controller	%
38	TIC-93	Product sample heater temperature controller	%

Ανάλυση

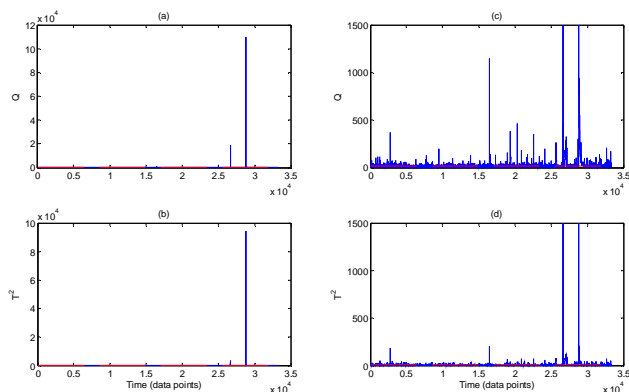
Μετά από προσεκτική εξέταση όλων των δεδομένων, επιλέχθηκαν τέσσερις διαφορετικές χρονικές περιόδους (6, 8, 19 και 23 Ιουνίου 2007), συνολικά 5317 χρονικά σημεία, ως αντιπροσωπευτικά σημεία κανονικής λειτουργίας της διεργασίας, τα οποία ενοποιήθηκαν για να απαρτίσουν το σύνολο των δεδομένων κανονικής λειτουργίας (NOD). Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος της Παράλληλης Ανάλυσης στα δεδομένα κανονικής λειτουργίας της μονάδας υδρογονοπυρόλυσης και προσδιορίστηκε ο αριθμός των κύριων συνιστωσών από τις οποίες μπορεί να κατασκευαστεί το μοντέλο PCA, ο οποίος βρέθηκε ίσος με 4 (Σχήμα 1). Αναπτύχθηκαν τα διαγράμματα στατιστικού ελέγχου (PCA) των δεδομένων κανονικής λειτουργίας και προσδιορίστηκαν έτσι τα όρια στατιστικού ελέγχου (control limits) (Σχήμα 2).

Τα διαγράμματα στατιστικού ελέγχου PCA αναπτύχθηκαν ακολούθως για όλα τα δεδομένα του πειράματος (Σχήμα 3) και μέσω αυτών έγινε ο εντοπισμός 3 σημείων υψηλής μεταβλητότητας του συστήματος, για περαιτέρω ανάλυση. Με μια πρώτη ματιά στο Σχήμα 3 (a, b) διαπιστώθηκε ότι στις 20 και 22 Ιουνίου 2007 υπήρχε σημαντική αλλαγή στη μεταβλητότητα του συστήματος, ενώ από τη μεγέθυνση του διαγράμματος (c, d) παρατηρήθηκε ότι και στις 17 Ιουνίου 2007 σημειώθηκε αξιοσημείωτη αλλαγή στη μεταβλητότητα. Κάθε περίπτωση εξετάστηκε επιμέρους.

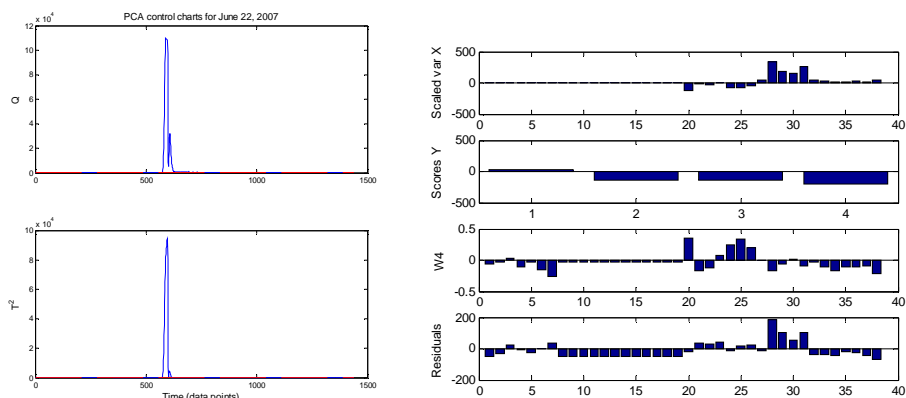
22 Ιουνίου 2007

Σύμφωνα με τα PCA διαγράμματα (Σχήμα 4), η κορυφή που υπάρχει στο σημείο δεδομένων N=589 της συγκεκριμένης ημέρας, υποδεικνύει υψηλή μεταβλητότητα της διεργασίας και διερευνάται περαιτέρω με τα διαγράμματα συμβολής του Σχήμα 4. Από το πρώτο διάγραμμα συμβολής φαίνεται ότι οι μεταβλητές 28-31 έχουν υψηλή μεταβλητότητα. Επιπλέον, από το δεύτερο διάγραμμα συμβολής προκύπτει ότι η τέταρτη κύρια συνιστώσα συμβάλλει περισσότερο σε αυτήν την μεταβλητότητα. Στο τρίτο διάγραμμα συμβολής φαίνεται ότι οι μεταβλητές 20 και 25 συνδέονται περισσότερο με την 4^η κύρια συνιστώσα και επομένως με την υψηλή μεταβλητότητα. Όλες αυτές οι μεταβλητές σχετίζονται με τη θερμοκρασία.

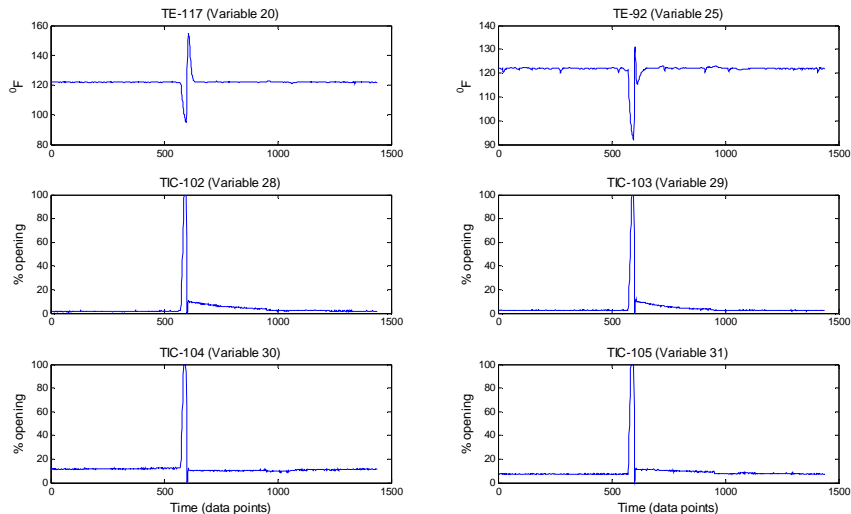
Αυτή η απότομη αλλαγή στη συμπεριφορά των ρυθμιστών θερμοκρασίας και η απότομη αύξηση στο 100% του ανοίγματος των αντιστάσεων είναι ένδειξη είτε κάποιου τυχαίου συμβάντος (π.χ. πτώση ασφάλειας), είτε προβλήματος στην ανταπόκριση των θερμοστοιχείων, το οποίο όμως αντιμετωπίστηκε άμεσα και επανήλθε το σύστημα στην κανονική του λειτουργία. Εφόσον το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε για περισσότερους από έναν ρυθμιστές θερμοκρασίας, οι οποίοι λειτουργούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, απορρίπτεται η περίπτωση να υπάρχει ένα εστιασμένο πρόβλημα στη λειτουργία ενός ρυθμιστή ή θερμοστοιχείου και επομένως κάποιος αστάθμητος παράγοντας ευθύνεται για το κλείσιμο όλων των θερμοστοιχείων συγχρόνως και κατά συνέπεια για τη γενικότερη πτώση της θερμοκρασίας, και το άνοιγμα 100% των ρυθμιστών αυτών κατά την επανέναρξη της λειτουργίας τους, προκειμένου να ανεβάσουν ξανά τη θερμοκρασία.



Σχήμα 3. Διαγράμματα ελέγχου PCA για τη μονάδα υδρογονοπυρόλυσης, για τις 2-25/6/2007



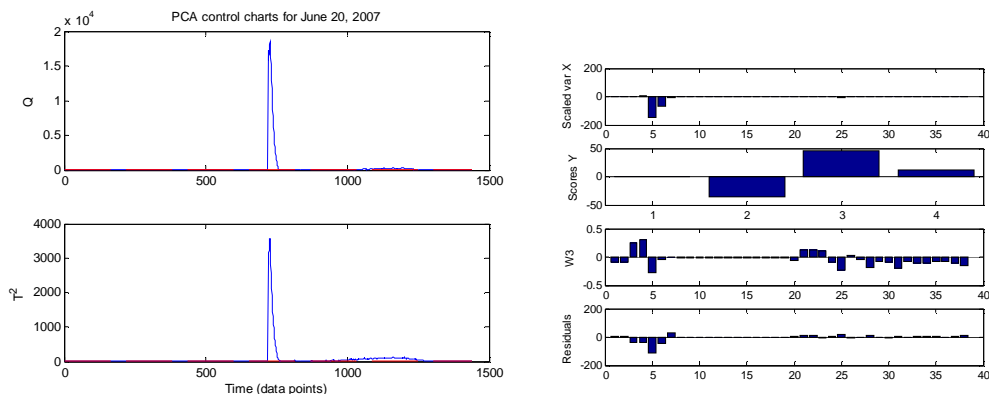
Σχήμα 4. Διαγράμματα ελέγχου PCA για τη μονάδα υδρογονοπυρόλυσης, για τις 22/6/2007 και διαγράμματα συμβολής για το σημείο δεδομένων N=589 (22/06/2007)



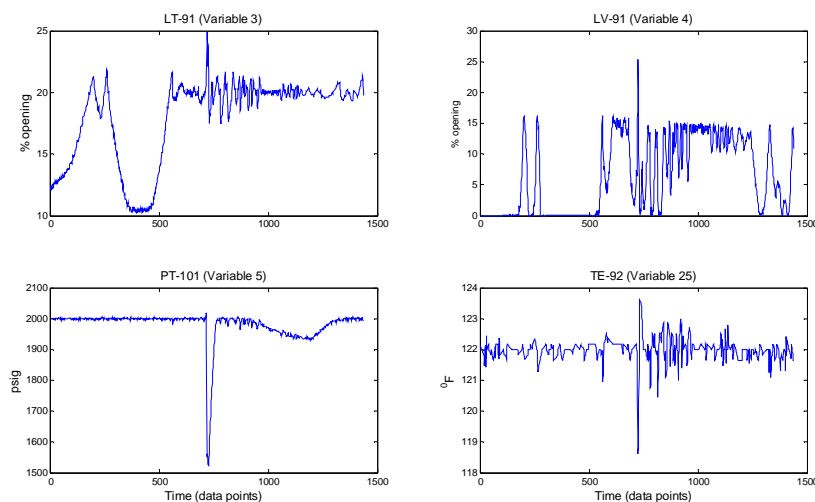
Σχήμα 5. Μεταβλητές 20, 25, 28, 29, 30, 31 στις 22 Ιουνίου 2007

20 Ιουνίου 2007

Για τις 20 Ιουνίου 2007 ενδιαφέρον παρουσιάζει το σημείο N=726 (Σχήμα 6). Οι μεταβλητές 5 και 6, δηλαδή η πίεση PT-101 μετά και PT-23 πριν τον αντιδραστήρα, είναι αυτές που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα (Σχήμα 6). Επίσης παρατηρήθηκε ότι οι μεταβλητές 3, 4, 5 και 25 έχουν μεγάλο συντελεστή βαρύτητας στην 3η συνιστώσα και για αυτό εξετάζονται κάθε μια ξεχωριστά (Σχήμα 6). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες αυτές οι μεταβλητές είναι στενά συνδεδεμένες με την πίεση του συστήματος (μεταβλητή 5), η οποία παρουσιάζει απότομη μεταβολή. Η ξαφνική πτώση της πίεσης οφείλεται σε προσχεδιασμένη / ηθελημένη ενέργεια που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της συντήρησης της μονάδας. Η πτώση της πίεσης ευθύνεται για την απότομη άνοδο στη στάθμη του διαχωριστή (μεταβλητή 3), η οποία ανάγκασε τη ρυθμιστική βάνα των υγρών να ανοίξει (μεταβλητή 4). Σημειώνεται ότι οι μεταβλητές των θερμοκρασιών (37 - 38) δεν παρουσιάζουν μεταβλητότητα όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Αυτό το γεγονός υποδεικνύει ότι διαταραχές στην πίεση και τη στάθμη του διαχωριστή δεν επηρεάζουν τη θερμοκρασία του συστήματος.



Σχήμα 6. Διαγράμματα ελέγχου PCA για τη μονάδα υδρογονοπυρόλυσης, για τις 20/6/2007 και διαγράμματα συμβολής για το σημείο δεδομένων N=726



Σχήμα 7. Μεταβλητές 3, 4, 5, 25 στις 20 Ιουνίου 2007

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διεργασία της υδρογονοπυρόλυσης είναι μια διεργασία πολλαπλών μεταβλητών, μερικές από τις οποίες συσχετίζονται μεταξύ τους και για αυτόν το λόγο χρειάζεται μια στατιστική μέθοδος πολλαπλών μεταβλητών για να περιγραφεί η μεταβλητότητα της διεργασίας. Από την Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών PCA εκτιμούμε ότι η διαστατικότητα της διεργασίας είναι περίπου 4, δηλαδή όσος ο αριθμός των κύριων συνιστωσών. Υπάρχουν 4 βαθμοί ελευθερίας ή 4 μεταβλητές που θα πρέπει να ελεγχθούν, αλλά δεν είναι προφανές ποιες είναι αυτές οι 4 μεταβλητές. Επιπλέον, σημειώνουμε ότι υπάρχουν $38-4 = 34$ συσχετίσεις μεταξύ των 38 μεταβλητών της διεργασίας.

Το πλεονέκτημα ελέγχου της διεργασίας μέσω των διαγραμμάτων PCA είναι ότι αντί να μελετηθούν όλες τις μεταβλητές της διεργασίας χωριστά, ελέγχθηκαν μόνο τα διαγράμματα του Q και T^2 , τα οποία μπορούν να περιγράψουν τη συμπεριφορά διεργασίας. Από τη μελέτη των διαγραμμάτων ελέγχου PCA, σε συνδυασμό με τα διαγράμματα συμβολής σε σημεία υψηλής μεταβλητότητας, ανιχνεύτηκαν διαταραχές της διεργασίας και εντοπίστηκαν τα αίτια που τις προκάλεσαν.

Διαπιστώθηκε ότι η πίεση είναι μια από τις μεταβλητές, η οποία επηρεάζει καθοριστικά τη συνολική μεταβλητότητα της διεργασίας. Σημειώνουμε ότι η μεταβλητότητα πίεσης και στάθμης διαχωριστή μεταβάλλονται σχεδόν ταυτόχρονα, γεγονός που υποδεικνύει την έντονη συσχέτιση των δυο μεταβλητών. Σε αντίθεση με την πίεση, η θερμοκρασία στη συγκεκριμένη διεργασία φαίνεται να είναι ρυθμίζεται σωστά και η όποια αποτυχία στη ρύθμισή της μπορεί να αποδοθεί μόνο σε εξωγενείς τυχαίους παράγοντες, όπως η πτώση ασφάλειας που διαγνώστηκε.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Kano, M., Hasebe, S., Hashimoto, I., and Ohno, Computers and Chemical Engineering. **28**:1157 (2004).
- [2]. Kourti, T., and MacGregor, J.F., Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. **28**:3 (1995).
- [3]. Martin, E.B., Morris, A.J., Papazoglou, M.C., and Kiparissides, C, Computers and Chemical Engineering. **20**:599 (1996).
- [4]. Kresta J. V., MacGregor, J.F., and Marlin, T.E., Can. Journal of Chemical Engineering. **69**:35 (1991).
- [5]. Chen, J., Bondoni, J.A., and Romagnoli, J.A., AIChE Journal. **42**:3563 (1996).
- [6]. MacGregor, J.F., Jaeckle, C., Kiparissides, C., and Koutoudi, M., AIChE Journal. **40**:826 (1994).
- [7]. Nomikos, P., ISA Transactions. **35**:259 (1996).
- [8]. Rännar, S., MacGregor, J.F. , and Wold, S., Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. **41**:73 (1998).
- [9]. Ku, W., Storer, R. H., and Georgakis, C., Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. **30**:179 (1995).
- [10]. Tsung, F., Int. J. Prod. Res. **38**:625 (2000).
- [11]. Rotem, Y., Wachs, A., and Lewin, D.R., AIChE Journal. **46**:1825 (2000).
- [12]. Bakshi, B.R., AIChE Journal. **44**:1596 (1998).
- [13]. Duchesne, C., Kourti, T., and MacGregor, J.F., AIChE Journal. **48**:2890 (2002).
- [14]. Albazzaz, H., Wang, X.Z., Industrial and Engineering Chemistry Research. **43**:6731 (2004).
- [15]. Georgakis, C., Steadman, B., and Liotta, V., IEEE Press, Piscataway, NJ, USA. 97 (1996).
- [16]. Chiang, L.H., Russell, E.L., and Braatz, R.D., Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. **50**:243 (2000).
- [17]. Jackson, J., E., A user's guide to Principal Component Analysis, John Wiley & sons, New York (1990).
- [18]. K.R. Beebe, R.J. Pell and M.B. Seasholtz, Chemometrics: A Practical Guide, John Wiley & Sons (1998).
- [19]. L.H. Chiang, E.L. Russell and R.D. Braatz, Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems, Springer-Verlag (2001).
- [20]. Himes, D., Georgakis, C., and Storer, R. H., In Proceedings of American Control Conference, Baltimore, USA, June 29-July 1, 1279 (1994).
- [21]. <http://www.osisoft.com/Products/PI%20System/>